

Disminución del THD con la implementación de un control para un filtro de potencia activa con derivación monofásica en sistemas de distribución con alta penetración de cargas no lineales

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
ELECTRICIDAD**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DISMINUCIÓN DEL THD CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL
PARA UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVA CON DERIVACIÓN
MONOFÁSICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ALTA
PENETRACIÓN DE CARGAS NO LINEALES.**

**AUTOR:
ANDY GERARDO TOAPANTA TACO**

**TUTOR:
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

Quito, Noviembre 2021

Andy Gerardo Toapanta Taco

Disminución del THD con la Implementación de un Control para un Filtro de Potencia Activa con Derivación Monofásica en Sistemas de Distribución con Alta Penetración de Cargas no Lineales.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Andy Gerardo Toapanta Taco (Y'1999). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Industrial Miguel de Santiago", se graduó de bachiller en Instalación de Equipos y Máquinas Eléctricas. Estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en la Disminución del THD con la implementación de un control para un filtro de potencia activa con derivación monofásica en sistemas de distribución con alta penetración de cargas no lineales.

atoapantat4.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Dario Jaramillo Monge (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

mjaramillo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, *Disminución del THD con la Implementación de un Control para un Filtro de Potencia Activa con Derivación Monofásica en Sistemas de Distribución con Alta Penetración de Cargas no Lineales*. realizado por Andy Gerardo Toapanta Taco, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Noviembre de 2021



.....

Manuel Dario Jaramillo Monge

C.C.: 1714298005

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Andy Gerardo Toapanta Taco, con documento de identificación N° 175031126-6, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *Disminución del THD con la Implementación de un Control para un Filtro de Potencia Activa con Derivación Monofásica en Sistemas de Distribución con Alta Penetración de Cargas no Lineales*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Noviembre 2021



.....
Andy Gerardo Toapanta Taco

C.C.: 175031126-6

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract	1
1 Introducción	3
2 Marco teórico	4
2.1 Distorsión armónica dentro de los sistemas eléctricos de distribución	4
2.2 Definición y caracterización de los armónicos.....	4
2.2.1 Tipos de armónicos y sus denominaciones	5
2.2.2 Distorsión armónica total (THD)	6
2.2.3 Normativa de armónicos	6
2.3 Control para filtros de potencia activa con derivación monofásica	6
2.3.1 Componentes básicos de un SPAPF.....	7
2.4 Clásica operación de un APF	8
2.4.1 Técnica monofásica p-q para la generación de la corriente de referencia.....	8
3 Planteamiento del problema	9
3.1 Formulación del problema	9
3.2 Sistema eléctrico de prueba de la IEEE.	9
3.2.1 Micro-red de distribución Híbrida AC/DC de 14 barras de la IEEE	9
3.3 Control de filtro de potencia activa con derivación monofásica (SPAF).....	10
3.4 Casos de Estudio	11
4 Análisis de resultados.....	13
4.1 Disminución del THD en la barra 8 con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores	13
4.2 Disminución del THD en la barra 9 con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores.....	13
4.3 Disminución del THD en la barra 8 y 9 de manera simultánea con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores.	14
4.4 Disminución del THD con el aumento de potencia reactiva en las cargas del sistema.....	15
4.4.1 Aumento del 25% de potencia reactiva sobre las cargas	15
4.4.2 Aumento del 50% de potencia reactiva sobre las cargas	16
4.5 Disminución del THD en las barras del sistema	16
5 Conclusiones	20
6 Recomendaciones.....	21
Referencias.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principio de funcionamiento del SPAPF.....	6
Figura 2. Tipo de inversor alimentado por tensión shunt APF.....	7
Figura 3. Adaptación de la técnica de filtrado para generación de corriente de referencia.....	8
Figura 4. Micro-red de distribución híbrida AC/DC de 14 barras.....	9
Figura 5. Control de filtro de potencia activa con derivación monofásica implementado	10
Figura 6. Banco de capacitores Trifásico.....	11
Figura 7. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en la barra 8.....	11
Figura 8. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en la barra 9.....	11
Figura 9. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en las barras 8 y 9.....	11
Figura 10. Comparación de la forma de onda de voltaje con y sin filtro en la barra 8	12
Figura 11. Comparación de la forma de onda de voltaje con y sin filtro en la barra 9.....	12
Figura 12. Onda de voltaje de la barra 8 con la conexión de los SPAFs en las barras 8 y 9.....	13
Figura 13. Onda de voltaje de la barra 9 con la conexión de los SPAFs en las barras 8 y 9.....	13
Figura 14. Onda de voltaje de la barra 8 en el caso C, añadiendo el 25% de Q en las cargas...	14
Figura 15. Onda de voltaje de la barra 9 en el caso C, añadiendo el 25% de Q en las cargas...	14
Figura 16. Onda de voltaje de la barra 8 en el caso C, añadiendo el 50% de Q en las cargas...	14
Figura 17. Onda de voltaje de la barra 9 en el caso C, añadiendo el 50% de Q en las cargas...	14
Figura 18. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso A	15
Figura 19. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso B	16
Figura 20. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso C	16
Figura 21. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso D (25%)	17
Figura 22. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso D (50%)	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables para mejorar en el sistema	4
Tabla 2. Tipos de cargas no-lineales	4
Tabla 3. Tipos de armónicos	5
Tabla 4. Normalización del THD en la corriente	6
Tabla 5. Normalización del THD para el voltaje	6
Tabla 6. Valores de voltaje [p.u] sistema híbrido AC/DC de 14 barras	10
Tabla 7. Configuración del banco de capacitores para la barras 8	11
Tabla 8. Configuración del banco de capacitores para la barras 9	11
Tabla 9. Configuración del banco de capacitores para las barras 8 y 9 respectivamente	12
Tabla 10. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 8	13
Tabla 11. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 9.....	14
Tabla 12. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 8 y 9..	14
Tabla 13. Armónicos sobre las ondas de voltaje de las barras 8 y 9, aumentando el 25% en Q..	15
Tabla 14. Armónicos sobre las ondas de voltaje de las barras 8 y 9, aumentando el 50% en Q..	16
Tabla 15. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso A	17
Tabla 16. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso B	18
Tabla 17. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C	18
Tabla 18. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C (25%) ...	19
Tabla 19. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C (50%) ...	19

Disminución del THD con la Implementación de un Control para un Filtro de Potencia Activa con Derivación Monofásica en Sistemas de Distribución con Alta Penetración de Cargas no Lineales.

Resumen

En el presente documento se detalla las características de las cargas no lineales que se encuentran conectadas dentro de los sistemas eléctricos de distribución y se definen según el tipo de carga al que pertenezcan, siendo éstos los principales elementos de generación de armónicos (THD) hacia la red. En el documento se plantea un control para un filtro de potencia activa con derivación monofásica (SPAFs) como una solución efectiva para disminuir el THD. Se debe tomar en cuenta que los SPAFs son filtros pasivos monofásicos que se conectan en serie y debido a sus componentes se muestra en el sistema como un componente adicional, por tal motivo se propone implementar bancos de capacitores trifásicos que son capaces de mantener los perfiles de voltaje en valores aceptables, mejorando la calidad de la energía debido al fenómeno eléctrico que se producen a causa de los armónicos. Se detalla también que en el presente documento se muestra cuatro casos de estudio en donde se realizará la implementación en serie de los SPAFs junto con el banco de capacitores trifásicos sobre el sistema híbrido AC/DC de 14 barras de la IEEE, además se selecciona las barras con mayor problema de armónicos, finalmente se hará un comparativo respecto al porcentaje del THD como la principal variable, todo el trabajo se simulará en MATLAB/SIMULINK, siendo éste un programa para validar resultados mediante gráficas y tablas .

Abstract

This document details the characteristics of the non-linear loads that are connected within the electrical distribution systems and they are defined according to the type of load to which they belong, these being the main elements of generation of harmonics (THD) towards the net. In the document, a control for an active power filter with single-phase shunt (SPAFs) is proposed as an effective solution to lower THD. It should be taken into account that SPAFs are single-phase passive filters that are connected in series and due to their components it is shown in the system as an additional component, for this reason it is proposed to implement three-phase capacitor banks that are capable of maintaining the profiles of voltage in acceptable values, improving the quality of power due to the electrical phenomenon that occurs due to harmonics. It is also detailed that in this document four case studies are shown where the serial implementation of the SPAFs is carried out together with the bank of three-phase capacitors on the IEEE 14-bar AC / DC hybrid system. bars with a greater harmonic problem, finally a comparison will be made regarding the percentage of THD as the main variable, all the work will be simulated in MATLAB / SIMULINK, this being a program to validate results using graphs and tables.

Palabras Clave: Cargas no lineales, calidad de la energía, distorsión armónica total, filtro de potencia activa con derivación monofásica, banco de capacitores. **Keywords:** Non-linear loads, power quality, total harmonic distortion, single-phase shunt active power filter, shunt capacitor bank.

1 Introducción

En el pasado el SEP se caracterizaba porque las cargas eran de tipo lineal, debido a que se componía de elementos netamente resistivos. Con el pasar del tiempo la industrialización impulsó la integración de motores, además se promovía técnicas para el control de velocidad mediante diferentes elementos eléctricos.

Muchos elementos comenzaron a depender de transformadores, aparecieron los diodos y transistores, junto con esto aparece una nueva era llamada electrónica, teniendo en cuenta que cualquier dispositivo que utilice elementos semi conductores son no lineales [1]. La presencia de cargas no lineales en cada una de las fases reduce drásticamente la calidad de la energía sobre la red, las mismas que emiten elementos armónicos a las fuentes de entrada [2].

Con el uso de la electrónica de potencia dentro del sistema de distribución, se ha visto afectada gravemente la calidad de la energía por la incidencia de armónicos que aparecen sobre la red que cada vez son más notorios[3]. Los armónicos se caracterizan por la deformación de las formas de onda de las magnitudes eléctricas tanto de corriente como de voltaje, que generalmente aparecen por las cargas no lineales.

Uno de los mejores métodos para la disminución de los armónicos es la implementación de filtros pasivos (componentes inductivos y capacitivos). Para el diseño de los filtros a implementar se debe realizar un estudio cuidadoso con el objetivo de evitar que el THD se incremente en el sistema [4].

Más aún, los armónicos reducen drásticamente la eficiencia de la red, provocando el incremento relativo de la

oscilación en las ondas de tensión, posiblemente genera mayor interferencia en los sistemas de comunicación, por tal motivo se puede definir como un veneno a nivel eléctrico [5].

El desafío de los últimos años está centrado en la calidad de la energía eléctrica como parte de este estudio se habla de la supresión de armónicos siendo un tema muy estudiado. Esta supresión de los armónicos se encuentra dividido en activo y pasivo, representando al filtro pasivo se tiene a un elemento conocido como filtro de potencia activa (APF), el mismo que se implementa para obtener respuestas dinámicas, caracterizados por valores tomados en tiempo real, más aún tener un control completo frente a eventos que pueden suscitarse. Se argumenta que el APF, tiene buenas características y mejora los valores iniciales en estado estacionario [6].

El filtro de potencia activa es muy conocido por la eficiencia que posee para la solución de la calidad de energía como el caso de los armónicos, caídas de voltaje, fluctuaciones en la red e inestabilidad en el voltaje [7]. Una de las opciones de solución se ha desarrollado a lo largo de los años, el mismo que utiliza inversores de fuentes de tensión de una sola fase conocido como filtro de potencia activa (APF).

El método de control de corriente por histéresis ha sido introducido recientemente mediante un controlador integrativo- proporcional (PI), asociado al APF mostrándose como un método eficaz en la disminución de los armónicos [2]. En este documento, trabajamos sobre uno de los métodos más eficientes para la disminución de los armónicos de tensión, el mismo que definido como un filtro de potencia

activa con derivación monofásica (SPAF).

2 Marco teórico

En esta sección, se profundiza los conceptos manejados sobre este documento respecto a los armónicos, se detalla su tipología, además razones por las que se generan y su incidencia sobre las ondas sinusoidales de corriente y voltaje.

2.1 Distorsión armónica dentro de los sistemas eléctricos de distribución

Dentro de los sistemas de distribución existen problemas asociados a las variables eléctricas que aparecen a causa de las diferentes cargas conectadas al sistema y que se dividen en: residenciales, comerciales e industriales, afectando consecuentemente a las cargas denominadas sensibles, provocando así que las pérdidas sean mayores y que la calidad de la energía disminuya [8].

Cuando se habla de calidad de la energía en los sistemas de distribución eléctrica se tiene claro mantener un control completo respecto a la potencia reactiva, eliminación de armónicos y la corrección del factor de potencia, entre otros[9]. Dentro de los eventos que afectan a la calidad de la energía se tiene la eliminación de los armónicos que afecta las magnitudes eléctricas que se detallan en la tabla 1.

Tabla1. Variables para mejorar en el sistema.

Símbolo	Definición
V	Tensión
I	Corriente
F	Frecuencia

Los armónicos o también conocidos como THD, son fenómenos que se generan a causa de cargas netamente inductivas que en general son ocupadas por los diferentes usuarios para sus actividades cotidianas.

2.2 Definición y caracterización de los armónicos

En los últimos años, se observa el incremento de dispositivos electrónicos presentados como cargas no-lineales, siendo éstas las principales fuentes de armónicos. Adicionalmente, éstas cargas afectan negativamente la tensión nominal en los terminales de alimentación distorsionando la forma de onda de corriente y voltaje, a causa de la duplicidad sobre las bases de la frecuencia y sus derivados [10].

Aparecen diferentes aparatos eléctricos que pueden ser definidos como cargas no-lineales, algunos de ellos son[11]-[12]:

Tabla 2. Tipos de cargas no-lineales.

Cargas no-lineales	Dispositivos eléctricos
Basadas en arcos	<ul style="list-style-type: none"> Lámparas de descarga (fluorescentes, neón, mercurio, etc). Soldadores de arco. Hornos de arco.
Basadas en inductancias saturables	<ul style="list-style-type: none"> Transformadores Motores
Electrónicas	<ul style="list-style-type: none"> Rectificadores para cargas resistivas e inductivas. Recortadores y Reguladores. Compensadores estáticos (SVC,TCR). Fuentes alimentación (radios, televisores, refrigeradoras, impresoras PLCs, etc). Cargadores de baterías

Varios eventos negativos aparecen debido a la distorsión armónica, algunos de ellos son: más pérdidas en las redes de distribución, sobrecalentamiento de accionadores y mal funcionamiento de disyuntores y relés. Por tanto, es importante que los armónicos sean analizados estimando su amplitud y ángulo [13].

La secuencia de los armónicos comúnmente ocurre en valores impares, la magnitud de la frecuencia que trata sobre los armónicos es de múltiplo orden [14].

2.2.1 Tipos de armónicos y sus denominaciones

Realizando un estudio respecto a las causas que provocan la distorsión armónica se puede establecer dos tipos de armónicos [15].

Tabla 3. Tipos de armónicos.

Tipos de Armónicos	Características
Armónicos característicos o normales	Linealidad de aparatos eléctricos conectados en un sistema eléctricamente balanceado.
Armónicos no característicos o anormales	Producido por anomalías en los sistemas trifásicos a causa de los desbalances que pueden aparecer.
Armónicos fluctuantes o no estacionarios	Son generados debido al cambio de sus magnitudes a lo largo del tiempo en consecuencia de la variación de la carga.
Armónicos estacionarios	No varían a lo largo del tiempo se mantienen constantes las cargas monofásicas conectadas.

Los armónicos de tipo fluctuantes y no fluctuantes están netamente asociados a redes monofásicas debido a que se tiene cargas elementales que deben o no ser desconectadas según su uso a lo largo del

día, mientras que los armónicos normales y anormales hace referencia a cargas industriales trifásicas que afectan mucho más a la calidad de la energía.

Se conoce también que los armónicos que tienen una magnitud de frecuencia en los múltiplos de tres ($h=3,6,9,12$), son muy conocidos como armónicos triples [15]. Mientras que, los armónicos que tienen como magnitud múltiplos de dos ($h=2,4,6,8,10$) son conocidos como armónicos pares.

Las corrientes y voltajes armónicos se representan con valores numéricos enteros para cuantificar su frecuencia. Se conoce también, que se puede realizar un estudio de la señal distorsionada utilizando las series de Fourier [16]:

$$v = v_1 + \sum_{h \neq 1} v_h \quad (1)$$

Donde;

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (2)$$

$$v_h = \sqrt{2}V_h \sin(h * \omega t - \beta_h) \quad (3)$$

El cuadrado medio de la raíz del voltaje se calcula como:

$$V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt = V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_h^2 \quad (4)$$

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2 \quad (5)$$

Corriente

$$i = i + \sum_{h \neq 1} i_h \quad (6)$$

Donde;

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (7)$$

$$i_h = \sqrt{2}I_h \sin(h * \omega t - \alpha_h) \quad (8)$$

El cuadrado medio de la raíz del voltaje se calcula como:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_h^2 \quad (9)$$

$$I_H^2 = I_2^2 + \dots + I_h^2 \quad (10)$$

h	Designando el orden armónico.
I_H	Es el valor cuadrático medio de la corriente Armónicos.
V_H	Es el valor cuadrático medio del voltaje Armónicos.
V_h, I_h	Son los valores efectivos del armónico de rango h del voltaje y la corriente.
ω	Pulsación de la frecuencia fundamental.

2.2.2 Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica es posible cuantificar debido a la deformación de una señal con respecto a la señal sinusoidal original o también conocida como fundamental [16].

La distorsión armónica respecto al voltaje se formula como:

$$THD_{V\%} = 100 \frac{V_H}{V_1} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} \quad (11)$$

$$THD_{V\%} = 100 \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (12)$$

De igual manera, la formulación de la distorsión armónica de la corriente es:

$$THD_{I\%} = 100 \frac{I}{I_1} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} \quad (13)$$

$$THD_{I\%} = 100 \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (14)$$

2.2.3 Normativa de armónicos

La normativa emitida sobre los armónicos se encuentra establecida en IEEE, recomendada para mantener un control de THD en los sistemas de energía eléctrica (estándar IEEE 519-1992).

Tabla 4. Normalización del THD en la corriente.

I_{sc} / I_L	Distorsión Armónica de Corriente Individual (%)					I-THD Total (%)
	h	$11 \leq h$	$17 \leq h$	$23 \leq h$	$35 \leq h$	
	< 11	< 17	< 23	< 35	$\leq h$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 5. Normalización del THD para el voltaje.

Voltaje en PCC V_n (KV)	Voltaje de Distorsión Armónica (%)	V-THD Total (%)
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

Se conoce, que éste fenómeno afecta a la onda sinusoidal de voltaje y corriente, mostrando variables representadas como: el estándar armónico para corriente (I-THD) y el armónico estándar de voltaje (V-THD) [10].

2.3 Control para filtros de potencia activa con derivación monofásica

Los filtros de potencia activa (APF), son considerados una de las mejores soluciones frente a la erradicación de los armónicos, junto con un control simple, permitiendo así mantener el valor del THD dentro de los

límites establecidos por normativa IEEE [17].

En la figura 1, se muestra el principio de funcionamiento del SPAF con respecto a la compensación que es generada por la fuente de corriente alterna que ayuda a mejorar las variables que son afectadas debido a los armónicos.

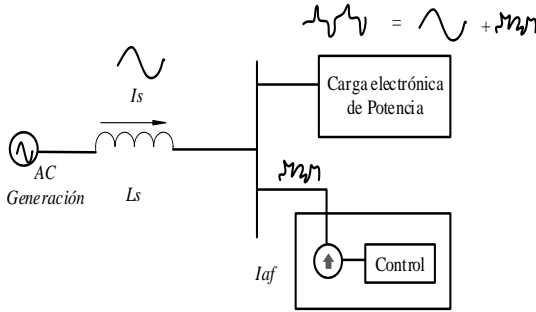


Figura 1. Principio de funcionamiento del SPAF.

2.3.1 Componentes básicos de un SPAF

En el siguiente apartado se detalla los principales componentes de un SPAFs, que trabajan de manera coordinada a fin de disminuir la presencia de los armónicos sobre la red, cada uno de ellos con su función en especial.

- **Controlador electrónico propuesto**

Para mantener a la corriente en dirección de la tensión del sistema, se debe satisfacer estrictamente con los conceptos de control:

$$\frac{v_{in}}{i_{in,avg}} = R_e \quad (15)$$

Donde

$i_{in,avg}$ Es la corriente promedio de conmutación dentro de un intervalo de tiempo.

R_e Constante de proporcionalidad.

La ecuación que representa el control que se propone en este documento se detalla como[18]:

$$R_s i_{in,avg} = R_s * \frac{V_o}{R_e} (1 - 2d) \quad (16)$$

$$R_s i_{in,avg} = v_m (1 - 2d) \quad (17)$$

Donde

R_s Ganancia de detección de corriente

v_m Hace referencia a $R_s * \frac{V_o}{R_e}$

d Constante de repetición.

Eliminar los armónicos es posible realizando un análisis en el dominio del tiempo, tomando en cuenta que este cálculo debe ser desarrollado en línea con una función que muestre el error de manera instantánea [17].

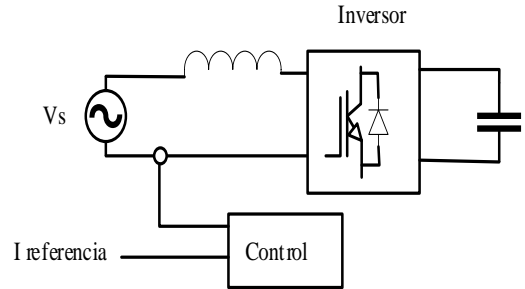


Figura 2. Tipo de inversor alimentado por tensión shunt APF.

- **Generador de ángulo de disparo**

Este generador se caracteriza por generar pulsos de puerta para que el inversor de voltaje inicie su funcionamiento [19].

- **Inversor de fuente de voltaje**

El PMW VSI, de dos niveles es el elemento que más se utiliza dentro de SPAPF, ya que a diferencia del VSI de tres niveles, el que se está manejando en este documento es muy completo para realizar el estudio del THD, y las variables que se ven involucradas en éste.

2.4 Clásica operación de un APF

Cuando no existe ningún fenómeno eléctrico dentro del sistema lo más correcto es que la forma de onda del voltaje sea sinusoidal.

$$u_s(t) = V_{sm} \sin \omega t \quad (18)$$

Donde ω se denomina frecuencia fundamental respecto al voltaje generado. Respecto, a la carga no lineal, se sabe que el armónico es de orden mayor como se muestra en a continuación:

$$i_L(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (19)$$

Se establece que la corriente generada por el inversor de potencia se representa como:

$$i_c(t) = i_L(t) - i_s(t) \quad (20)$$

Los filtros de potencia activa clásicos, su funcionamiento es simple ya que identifica la corriente de carga y de la fuente, para así calcular la corriente armónica. Conociendo ya las pérdidas por diferentes eventos dentro de los inversores, se implementa el controlador PI y LPF que son muy utilizados para bucles de tensión [20].

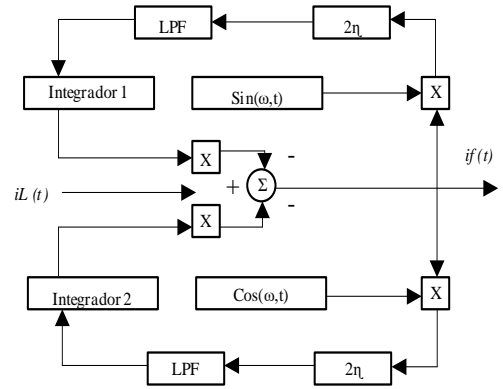


Figura 3. Adaptación de la técnica de filtrado para generación de corriente de referencia.

2.4.1 Técnica monofásica p-q para la generación de la corriente de referencia.

La teoría p-q de potencia reactiva es el mejor método que servirá para obtener señales de referencia de manera instantánea para el filtrado de potencia activa. Es importante resaltar que esta teoría solo se utilizaba para sistemas trifásicos, últimamente se promueve su uso para sistemas monofásicos.

La teoría monofásica se caracteriza principalmente por un instantáneo de $\pi/2$, en adelante, y un $/2$ en atraso para el voltaje y la corriente para definir el sistema como un caso bifásico. Fácilmente este sistema se puede mostrar como coordenadas. Para esto se establece a $\alpha - eje$, mientras que $\beta - eje$, se obtiene cantidades por $a/2$ en adelante y $\pi/2$ en retraso[21].

Se muestra la fuente de voltaje monofásica en $\alpha - \beta$ coordenadas con $\pi/2$ adelante.

$$\begin{bmatrix} v_{sa}(\omega t) \\ v_{s\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(\omega t) \\ v_s(\omega t + (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sa}(\omega t) \\ v_{s\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_m \sin(\omega t) \\ v_m \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

De igual manera la corriente de carga $\propto -\beta$ y sus coordenadas con $\pi/2$ adelante [21].

$$\begin{bmatrix} i_{La}(\omega t) \\ i_{L\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L\alpha}(\omega t + \varphi_L) \\ v_{s\beta}(\omega t + \varphi_L + (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (23)$$

3 Planteamiento del problema

En esta sección se describe más ampliamente el escenario de trabajo y los componentes que se utilizarán para cumplir con el objetivo planteado inicialmente, cada uno de ellos tendrán una breve descripción de su composición, más aún se explica brevemente el lugar en el que serán implementados.

3.1 Formulación del problema

Para el presente trabajo se realizará la implementación de filtros monofásicos de potencia activa sobre un sistema estandarizado, se realizará las simulaciones en el software Matlab/Simulink, para observar el comportamiento del THD, con el objetivo de observar el funcionamiento de los filtros se plantea dos escenarios, el primero realizando la simulación sin modificación alguna obteniendo valores de las magnitudes eléctricas, tanto de corriente y voltaje para hacer la comparación con los próximos escenarios, y la segunda parte con la implementación de los filtros monofásicos para disminuir el THD, adicional a esto se conecta bancos de

capacitores de diferente manera según el caso de estudio que se colocarán en las barras con mayor incidencia de armónicos con el fin de mejorar los perfiles de voltaje.

Es importante resaltar que el control del filtro de potencia activa con derivación monofásica y el banco de capacitores son ejemplos propios de MathWorks, los mismos que serán configurados para alcanzar con el objetivo del trabajo.

3.2 Sistema eléctrico de prueba de la IEEE.

El escenario que fue seleccionado para realizar las simulaciones de la efectividad de los SPAFs junto con los bancos de capacitores es una micro-red de distribución que se encuentra estandarizada bajo normativa IEEE, precisada para este tipo de estudios (armónicos), debido a las características que poseen las cargas asociadas al sistema, son muy similares a un comportamiento cotidiano de un determinado sector.

3.2.1 Micro-red de distribución Híbrida AC/DC de 14 barras de la IEEE

El sistema utilizado para el trabajo está compuesto por diferentes centrales de generación con diferentes características, los mismos que se encuentran conectados a una red externa con el objetivo de mejorar diferentes magnitudes eléctricas para el resto de la red. Por tal motivo, el sistema funciona a diferentes magnitudes de voltaje. En la tabla 6 se muestra los voltajes en [p.u], con los valores base en cada una de las barras.

Tabla 6. Valores de voltaje [p.u.] sistema híbrido AC/DC de 14 barras.

Barras	Voltaje base en la barra [L-L] (V)	Voltaje [p.u.]
BARRA 1	200	1,051
BARRA 2	200	1,021
BARRA 3	200	1,023
BARRA 4	200	1,064
BARRA 5	200	1,058
BARRA 6	13800	0,963
BARRA 7	13800	0,970
BARRA 8	2400	0,973
BARRA 9	13800	0,968
BARRA 10	13800	0,940
BARRA 11	13800	0,949
BARRA 12	13800	0,953
BARRA 13	13800	0,971
BARRA 14	13800	0,966

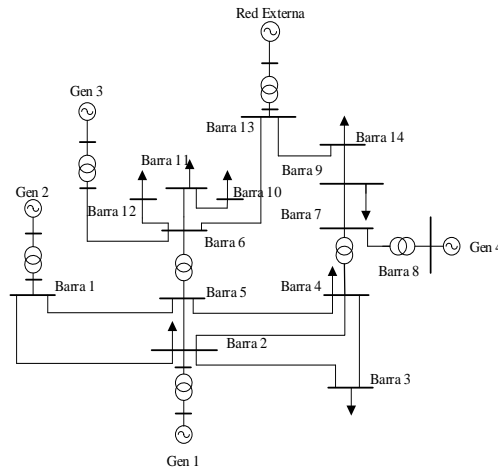


Figura 4. Micro-red de distribución híbrida AC/DC de 14 barras.

Se muestra claramente que el sistema trabaja a valores diferentes de magnitud de voltaje e inicialmente se encuentra trabajando de esa manera. En la figura 4 se muestra el sistema híbrido AC/DC de 14 barras de la IEEE.

3.3 Control de filtro de potencia activa con derivación monofásica (SPAF)

El filtro que se utiliza para el trabajo deberá ser sometido a diferentes configuraciones para disminuir el THD en la barra 8 y barra 9 que tienen alta incidencia de armónicos.

El SPAF con el que se está trabajando, este compuesto por diferentes elementos eléctricos como se muestra en la figura 4. Se modificará valores en el inversor, específicamente en los capacitores que componen este elemento eléctrico. Por otra parte, se muestra un bloque de pérdidas que también debe ser modificado ajustando los valores con los que se encuentra trabajado la barra en la que se implementará.

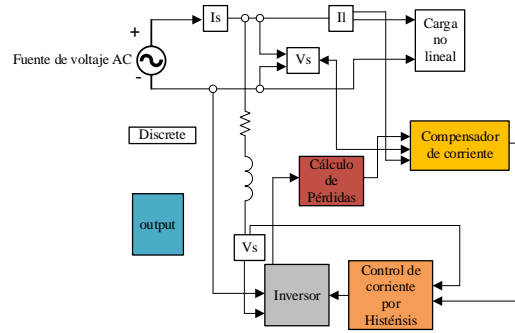


Figura 5. Control de filtro de potencia activa con derivación monofásica implementado.

Luego de seleccionar el filtro con el cual se trabajará se muestra también la implementación del banco de capacitores de manera simultánea en las barras en donde se analizan.

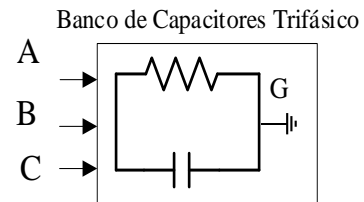


Figura 6. Banco de capacitores Trifásico.

El banco de capacitores con el que se trabajará tiene que configurarse con los valores de voltaje de las barras seleccionadas, para este caso ambas

barras tienen un voltaje 13.8 KV (L-L), y una cantidad de potencia activa la misma que se entregará a la microred, ayudando a que los perfiles de voltaje no bajen de manera significativa debido a la implementación de un elemento adicional que en este caso son los SPAFs.

3.4 Casos de Estudio

Se tienen diferentes casos de estudio para este trabajo los mismos que se desarrollan para diferentes escenarios, con el objetivo de tomar los valores numéricos de los parámetros que son objetos del análisis.

- **Caso 1: Ubicación del filtro de potencia activa y banco de capacitores en la barra 8.**

Dentro de este caso se implementa el filtro en cada una de las fases de la barra 8, en donde se encuentra conectado un sistema de generación a diesel a una potencia de 3 MVA, que debido a su configuración y a la presencia de un transformador de potencia de 3.5 MVA, se pronostica que existirá alta penetración de armónicos.

Es importante resaltar que debido a que ésta barra no contiene una carga en su simbología propia, el filtro debe ser conectado hacia la red para disminuir los armónicos. Es importante resaltar que el banco de capacitores para este caso de estudio, se configura los valores de las magnitudes eléctricas de voltaje y potencia activa como se detalla en la tabla 7.

Tabla 7. Configuración del banco de capacitores para la barra 8.

Barras	Banco de capacitores
Barra 8	V = 13.8 kV P = 900 KW

La configuración con los valores que se muestra en la tabla 7, siendo éstos los límites a los que debe trabajar para no afectar con el funcionamiento de los SPAFs y mantener los niveles de voltaje dentro de valores acertados.

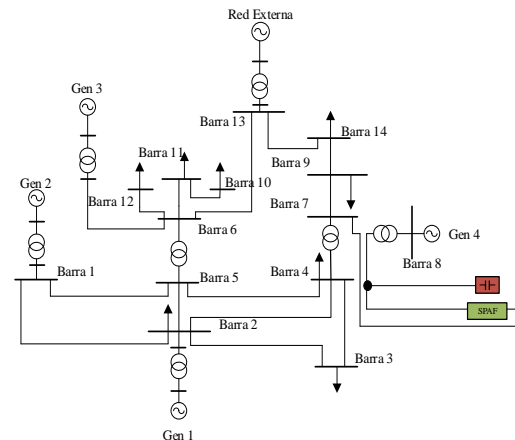


Figura 7. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en la barra 8.

- **Caso 2: Ubicación del filtro de potencia activa y banco de capacitores en la barra 9.**

En este caso se repite el procedimiento detallado en el caso anterior en cuanto a la conexión del filtro, y el banco de capacitores que para este caso tomará los siguientes valores tanto de voltaje como de potencia activa que tienen como límite para no afectar el funcionamiento del filtro, valores que se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Configuración del banco de capacitores para la barra 9.

Barras	Banco de capacitores
Barra 9	V = 13.8 kV P = 250 KW

La principal diferencia para este caso de estudio es el cambio de escenario para el análisis que en esta ocasión es la barra 9, en donde se puede apreciar que existe una carga no lineal con potencia reactiva

$Q = 320 \text{ KVA}$ y factor de potencia de $\cos(\phi)=1$.

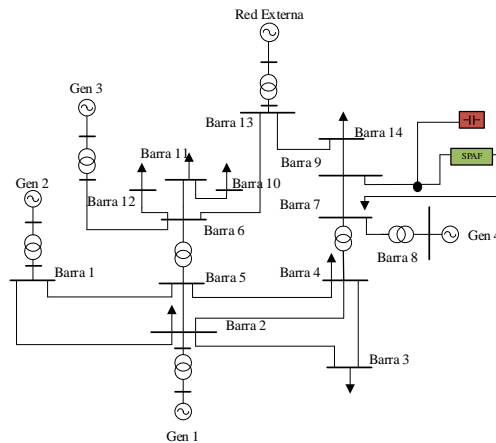


Figura 8. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en la barra 9.

- **Caso 3: Ubicación del filtro de potencia activa y banco de capacitores en la barra 8 y 9 simultáneamente.**

Para el caso 3, se conecta los SPAFs de manera simultánea repitiendo los escenarios planteados en el caso 1 y 2, desarrollando igual implementación tanto de los filtros como de los bancos de capacitores los mismos que tomarán los siguientes valores:

Tabla 9. Configuración del banco de capacitores para las barras 8 y 9 respectivamente.

Barras	Banco de capacitores
Barra 8	$V = 13.8 \text{ kV}$
	$P = 250 \text{ KW}$
Barra 9	$V = 13.8 \text{ kV}$
	$P = 250 \text{ KW}$

Los valores indicados en la tabla 9 funcionan de manera correcta respecto al mejoramiento de los perfiles de voltaje, y trabajan al límite para no afectar al funcionamiento del filtro, que en este caso de estudio se encuentra conectado en las 2 barras de manera simultánea.

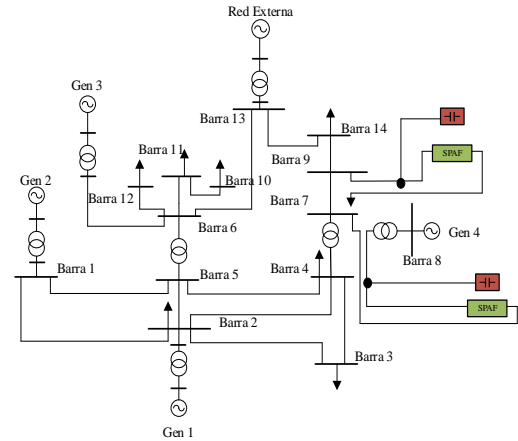


Figura 9. Conexión de los filtros y del banco de capacitores en las barras 8 y 9.

- **Caso 4: Ubicación del filtro de potencia activa en la barra 8 y 9 y el aumento del 25 % y 50% de Q sobre las cargas.**

Dentro del caso de estudio número 4 se desarrollan dos literales, los mismos que buscan hacer una modificación sobre las cargas (2,3,4,10,11,12,14) que se encuentran conectadas en las diferentes barras del sistema. Más aún, se repite la conexión de los filtros y del banco de capacitores (mismos valores de V y P) del caso C, realizado sobre las barras 8 y 9 simultáneamente.

- Aumento del 25 %

En la primera parte del caso de estudio se aumenta en todas las cargas que fueron señaladas al inicio el 25 % en la potencia reactiva (Q), con el objetivo de observar la eficiencia del filtro cuando ocurre este evento dentro del sistema.

- Aumento del 50 %

Por otra parte, en el segundo escenario del caso de estudio únicamente se realiza la modificación del aumento de

potencia reactiva en cada una de las cargas que en esta ocasión será del 50 %.

4 Análisis de resultados

En el siguiente apartado se muestra los resultados de todos los casos que se detallaron en la sección anterior y se muestra la comparación del escenario inicial y el escenario final, con la implementación los SPAFs.

4.1 Disminución del THD en la barra 8 con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores

Al implementar los filtros en cada una de las fases de la barra 8 y el banco de capacitores trifásico se logró disminuir los armónicos como se muestra en la tabla 10. Además, se analiza el orden de los armónicos de la forma de onda de voltaje, simulando sobre los escenarios con filtro y sin filtro, dando como resultado una forma de onda como se muestra en la figura 10.

Tabla 10. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 8.

Armónicos en la onda de la barra 8 (Voltaje)		
Armónicos	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]
2° armónico	0.68	1.73
3° armónico	1.14	0.57
4° armónico	1.58	0.81
5° armónico	1.29	2.45
6° armónico	2.51	1.44
7° armónico	3.25	0.78
8° armónico	3.22	1.51
9° armónico	3.65	1.23
10° armónico	3.67	0.89
11° armónico	3.83	1.25
12° armónico	3.84	0.75

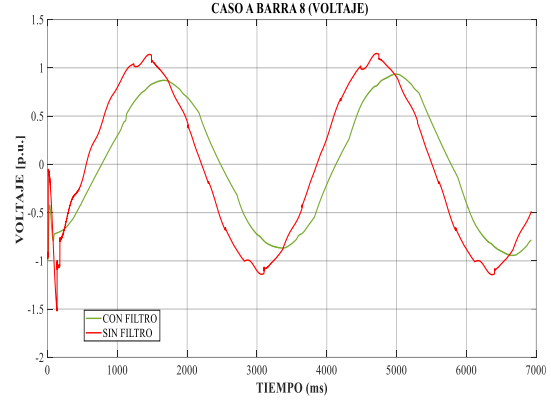


Figura 10. Comparación de la forma de onda de voltaje con y sin filtro en la barra 8.

Se puede observar claramente el funcionamiento de los SPAFs, ya que la forma de onda de voltaje luego de la implementación del filtro es más perfecta, eliminando los picos que generan mayores problemas sobre el sistema debido a las cargas que se encuentran conectados al mismo.

4.2 Disminución del THD en la barra 9 con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores.

Se realiza el estudio implementando los SPAFs y banco de capacitores sobre la barra 9, como se conoce hacia esta barra se encuentra conectada una carga no lineal que por lo general son los principales elementos que generan armónicos hacia la red.

Se obtiene los valores de los armónicos para los escenarios con filtro y sin filtro, mostrando que se logra reducir el porcentaje luego de la implementación del SPAFs como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 9.

Armónicos en la onda de la barra 9 (Voltaje)		
Armónicos	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]
2° armónico	0.33	2.12
3° armónico	0.66	0.16
4° armónico	1.06	1.28
5° armónico	0.27	4.36
6° armónico	1.55	1.20
7° armónico	2.35	1.85
8° armónico	1.94	1.10
9° armónico	2.31	0.64
10° armónico	2.25	0.70
11° armónico	2.93	1.53
12° armónico	1.70	0.93

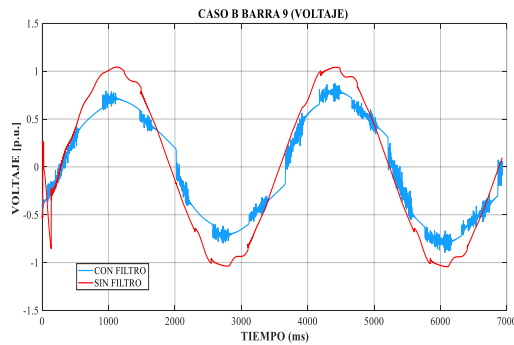


Figura 11. Comparación de la forma de onda de voltaje con y sin filtro en la barra 9.

En la figura 11 se observa que la señal de voltaje luego de la implementación del filtro tiene cierto ruido generado por la carga conectada sobre esa barra, pero se puede observar una mejor forma de onda respecto a la que no tiene ninguna modificación.

4.3 Disminución del THD en la barra 8 y 9 de manera simultánea con la implementación de los SPAFs y banco de capacitores.

Luego de la implementación de los filtros de manera simultánea sobre las barras 8 y 9, se observa que existe

mejoría sobre la forma de onda de voltaje, y se muestra que los resultados son mejores si se conectan los SPAFs en una sola barra.

Para el caso de estudio que se está analizando, también se muestra el orden de los armónicos respecto a dos escenarios planteados en el inicio generando valores como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Orden de los armónicos sobre la onda de voltaje con y sin filtrado en la barra 8 y 9.

Armónicos en las ondas de las barras 8 y 9 (Voltaje)				
Armónicos	Barra 8		Barra 9	
	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]
2° armónico	0.68	2.93	0.33	3.07
3° armónico	1.14	1.01	0.66	0.74
4° armónico	1.58	3.62	1.06	0.61
5° armónico	1.29	0.53	0.27	1.59
6° armónico	2.51	1.73	1.55	1.31
7° armónico	3.25	2.68	2.35	1.35
8° armónico	3.22	0.73	1.94	0.76
9° armónico	3.65	0.10	2.31	0.76
10° armónico	3.67	0.87	2.25	0.44
11° armónico	3.83	0.42	2.93	1.06
12° armónico	3.84	1.04	1.70	0.59

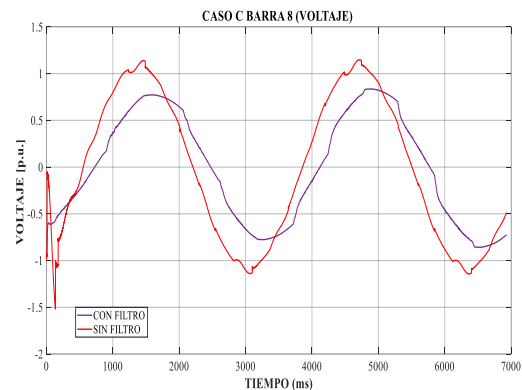


Figura 12. Onda de voltaje de la barra 8 con la conexión de los SPAFs en las barras 8 y 9.

En la figura 12 se aprecia ambas formas de onda, y se puede argumentar

que ésta gráfica respecto a la figura 10 del caso A son muy parecidas, pero existe una diferencia respecto a la perfección de la onda que se muestra en la parte superior, debido a que sufrió una deformidad no tan expresiva pero importante de resaltar.

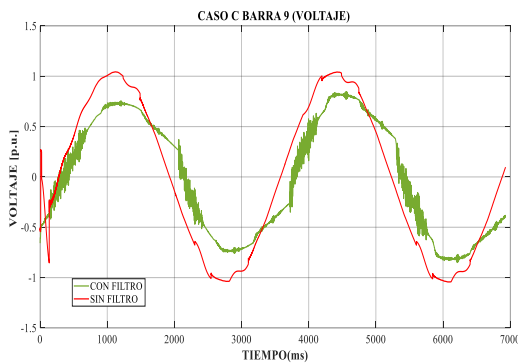


Figura 13. Onda de voltaje de la barra 9 con la conexión de los SPAFs en las barras 8 y 9.

Por otra parte, en la figura 13 se muestra otra señal con ruidos, como ya se había visto en el caso B, pero si se observa detalladamente se puede concluir que para este caso de estudio la forma de onda a menorado la deformidad generada por la carga con respecto al caso anterior.

4.4 Disminución del THD con el aumento de potencia reactiva en las cargas del sistema.

Finalmente, en el último caso de estudio se muestra que los SPAFs cumplen con el objetivo de disminuir los armónicos aun cuando las cargas aumentan su potencia reactiva dentro de porcentajes notables.

4.4.1 Aumento del 25% de potencia reactiva sobre las cargas

En el presente apartado se muestra un evento que puede suceder dentro de un

sistema, que los diferentes tipos de carga que se encuentran conectadas a la red consuman más potencia reactiva, para esto se simula la multiplicación de cada una de las cargas por el (25%) adicional, y se muestra que los filtros pueden cumplir con su objetivo a pesar del evento inesperado como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Armónicos sobre las ondas de voltaje de las barras 8 y 9, aumentando el 25% en Q.

Armónicos	Barra 8		Barra 9	
	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]	Sin Filtrado [%]	Con Filtrado [%]
2° armónico	0.68	2.65	0.33	3.76
3° armónico	1.14	1.01	0.66	0.42
4° armónico	1.58	3.37	1.06	0.51
5° armónico	1.29	0.39	0.27	1.33
6° armónico	2.51	1.57	1.55	1.47
7° armónico	3.25	2.55	2.35	1.23
8° armónico	3.22	0.60	1.94	0.84
9° armónico	3.65	0.17	2.31	0.66
10° armónico	3.67	0.92	2.25	0.54
11° armónico	3.83	0.29	2.93	0.86
12° armónico	3.84	0.92	1.70	0.66

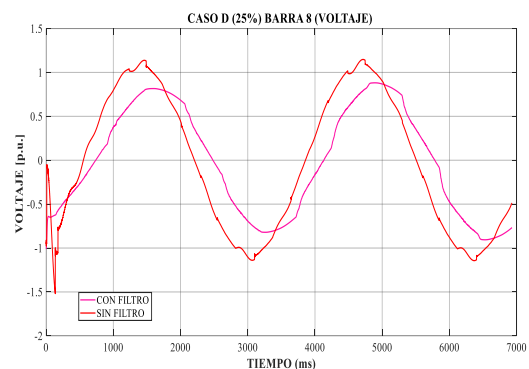


Figura 14. Onda de voltaje de la barra 8 en el caso C, añadiendo el 25% de Q en las cargas.

En la figura 14 se observa que el filtro cumple con trabajo respecto a disminuir el THD, se observa que la forma de onda en la barra 8 es muy similar respecto a la

del caso C, no ha cambiado significativamente, de igual manera sucede con la forma de onda en la barra 9, como se muestra en la figura 15.

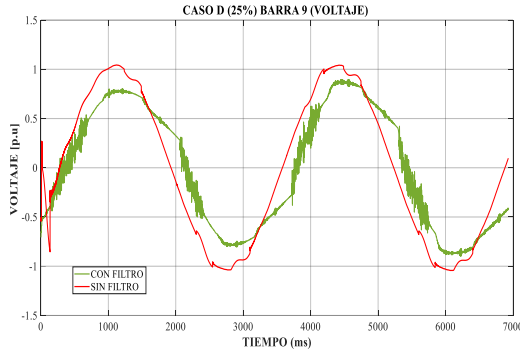


Figura 15. Onda de voltaje de la barra 9 en el caso C, añadiendo el 25% de Q en las cargas.

4.4.2 Aumento del 50% de potencia reactiva sobre las cargas

Finalmente, para esta sección se aumentó aún más la potencia reactiva de las cargas del sistema a un 50 %, y se puede apreciar en la tabla 14 que los filtros disminuyeron también la incidencia de armónicos sobre las barras que son parte de nuestro análisis.

Tabla 14. Armónicos sobre las ondas de voltaje de las barras 8 y 9, aumentando el 50% en Q.

Armónicos en las ondas de las barras 8 y 9 con el aumento del 50% de Q.				
Armónicos	Barra 8		Barra 9	
	Sin Filtro [%]	Con Filtro [%]	Sin Filtro [%]	Con Filtro [%]
2° armónico	0.68	2.62	0.33	3.72
3° armónico	1.14	1.09	0.66	0.41
4° armónico	1.58	3.35	1.06	0.74
5° armónico	1.29	0.39	0.27	1.31
6° armónico	2.51	1.52	1.55	1.44
7° armónico	3.25	2.51	2.35	1.18
8° armónico	3.22	0.61	1.94	0.85
9° armónico	3.65	0.21	2.31	0.65
10° armónico	3.67	0.97	2.25	0.57
11° armónico	3.83	0.27	2.93	0.84
12° armónico	3.84	0.87	1.70	0.43

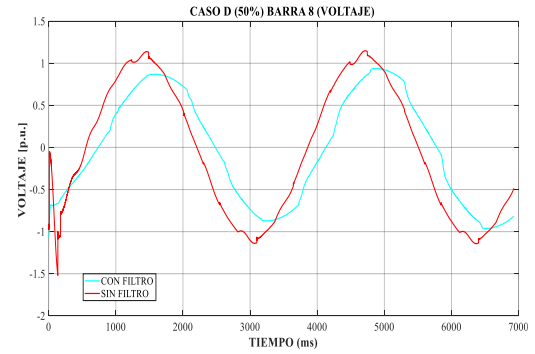


Figura 16. Onda de voltaje de la barra 8 en el caso C, añadiendo el 50% de Q en las cargas.

Es importante resaltar que en este caso de estudio las formas de onda del voltaje parecen iguales respecto a los casos anteriores, pero si se observa detalladamente se puede apreciar que existe diferencias mínimas respecto a la perfección de la onda, que se presenta en la figura 16 y 17.

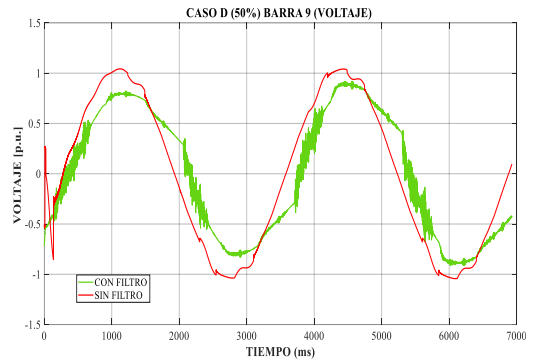


Figura 17. Onda de voltaje de la barra 9 en el caso C, añadiendo el 50% de Q en las cargas.

Para concluir con esta sección se argumenta que los filtros de potencia activa con derivación monofásica (SPAFs), ayudan de manera puntual a mejorar las formas de onda de cada una de las barras seleccionadas, que fue el objetivo en esta parte del documento.

4.5 Disminución del THD en las barras del sistema

En la sección anterior se pudo observar que el estudio realizado fue

muy centrado respecto a las barras con mayor incidencia de armónicos, más aún es importante analizar qué pasa con el resto del sistema, para esto se muestra las magnitudes en porcentaje totales sobre cada una de las barras del sistema, y se realiza la simulación repitiendo cada uno de los casos de estudio.

- **Caso A: Comportamiento del sistema con la conexión de los elementos en la barra 8.**

Se muestran los resultados del primer escenario donde se implementa el SPAF, para el primer caso se selecciona la barra 8, siendo ésta la barra con mayor incidencia de armónicos, y se muestra los resultados del THD sobre cada una de las barras como se describe en la tabla 15.

Tabla 15. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso A.

Barras	THD (%) (Original)	THD (%) (Mejorado)
BARRA 1	10,60	7,15
BARRA 2	14,10	8,55
BARRA 3	10,58	7,62
BARRA 4	10,69	7,92
BARRA 5	8,13	6,55
BARRA 6	7,98	6,50
BARRA 7	10,52	7,83
BARRA 8	15,21	7,78
BARRA 9	11,22	11,06
BARRA 10	8,07	6,58
BARRA 11	8,03	6,55
BARRA 12	8,02	6,53
BARRA 13	8,14	6,66
BARRA 14	10,00	8,95

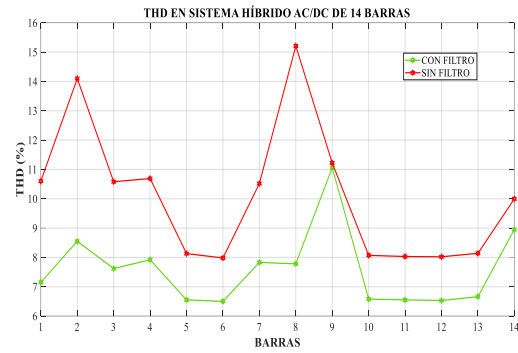


Figura 18. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso A.

En la figura 18 se muestra que en todo el sistema los armónicos disminuyen significativamente, a excepción de la barra 9 donde el valor del THD es muy similar en ambos escenarios, debido a que la carga no lineal que se encuentra conectada en dicho lugar es un generador asincrónico, que por sus características propias posee elementos inductivos provocando mayor porcentaje de armónicos sobre el sistema.

- **Caso B: Comportamiento del sistema con la conexión de los elementos en la barra 9.**

En el siguiente apartado se muestra los resultados del análisis sobre la segunda barra con mayor problema de armónicos. Como se sabe la barra 9 es una carga no lineal aparentemente de tipo industrial, ya que dentro de la carga se encuentra implementado una máquina eléctrica siendo esta una de las principales cargas no lineales que afectan a la calidad de la energía, y se encuentra conectada en una de las cargas del sistema de estudio. Sin embargo, se logra disminuir el porcentaje respecto al escenario original y los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso B.

Barras	THD (%) (Original)	THD (%) (Mejorado)
BARRA 1	10,60	9,62
BARRA 2	14,10	13,42
BARRA 3	10,58	9,42
BARRA 4	10,69	9,52
BARRA 5	8,13	7,12
BARRA 6	7,98	7,84
BARRA 7	10,52	9,07
BARRA 8	15,21	10,21
BARRA 9	11,22	11,34
BARRA 10	8,07	7,92
BARRA 11	8,03	7,89
BARRA 12	8,02	7,87
BARRA 13	8,14	7,90
BARRA 14	10,00	9,73

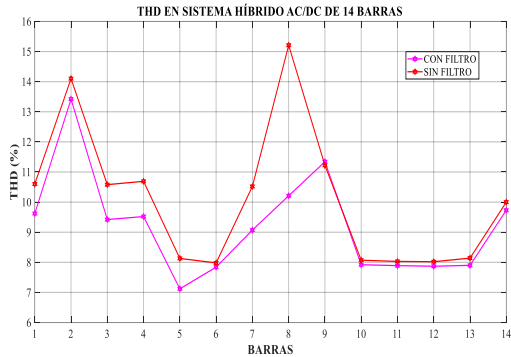


Figura 19. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso B.

Realizando la configuración sobre el filtro y el banco de capacitores que se conectan sobre la barra 9, se obtiene la mejor solución, y se muestra los resultados en la figura 19, concluyendo que los armónicos disminuyen respecto a los originales, pero sobre la barra donde se realiza el análisis sube en una pequeña cantidad, indicándonos que el sistema toma al filtro como una carga adicional, pero respecto al sistema en general el SPAF muestra su funcionalidad de manera correcta.

- Caso C: Comportamiento del sistema con la conexión de los elementos en la barra 8 y 9.**

Se muestra la disminución de los armónicos, luego de la configuración sobre los filtros y el banco de capacitores, implementando de manera simultánea sobre las barras con mayor THD debido a que las cargas que se encuentran conectadas son las principales fuentes de armónicos sobre este sistema, y los resultados se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C.

Barras	THD (%) (Original)	THD (%) (Mejorado)
BARRA 1	10,60	7,89
BARRA 2	14,10	9,83
BARRA 3	10,58	9,46
BARRA 4	10,69	9,94
BARRA 5	8,13	7,19
BARRA 6	7,98	7,76
BARRA 7	10,52	9,62
BARRA 8	15,21	9,55
BARRA 9	11,22	10,02
BARRA 10	8,07	7,84
BARRA 11	8,03	7,81
BARRA 12	8,02	7,79
BARRA 13	8,14	7,83
BARRA 14	10,00	9,87

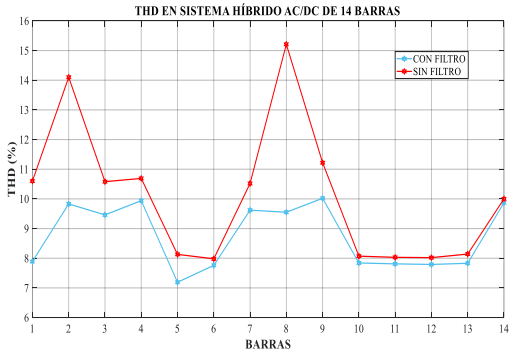


Figura 20. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso C.

Sobre el caso C, se muestra que la eficiencia del filtro es mayor sobre el sistema, cuando se conectan sobre dos o más barras sin importar las cargas que sobre cada una de ellas se conecten.

- **Caso D: Comportamiento del sistema con la conexión de los elementos en la barra 8 y 9, con el aumento del 25% y 50%.**

Para el paso final, se muestra la disminución de los armónicos cuando sobre cada una de las barras del sistema se incrementa el valor de potencia reactiva en diferentes porcentajes.

— Se incrementa la carga un 25%

Con el aumento de este porcentaje se muestra que el THD sobre las barras del sistema disminuye, algo importante de resaltar es que los perfiles de voltaje suben cuando ocurre este evento, los resultados se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C (25%).

Barras	THD (%) (Original)	THD (%) (Mejorado)
BARRA 1	10,60	7,55
BARRA 2	14,10	9,04
BARRA 3	10,58	9,39
BARRA 4	10,69	9,83
BARRA 5	8,13	7,12
BARRA 6	7,98	7,73
BARRA 7	10,52	9,53
BARRA 8	15,21	9,47
BARRA 9	11,22	10,00
BARRA 10	8,07	7,84
BARRA 11	8,03	7,79
BARRA 12	8,02	7,77
BARRA 13	8,14	7,80
BARRA 14	10,00	9,84

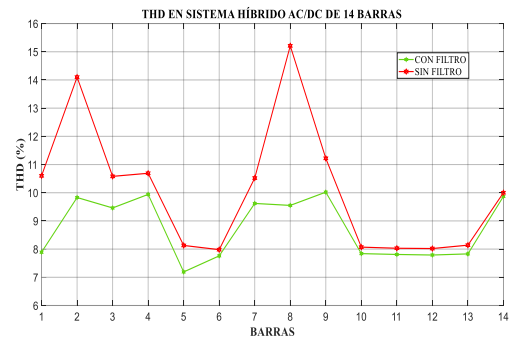


Figura 21. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso D (25%).

Como se muestra en la figura 21 el THD disminuye aún más con el aumento de la potencia reactiva del 25% sobre cada una de las cargas, a partir de la barra 10 no existe disminución muy expresiva, pero respecto al comportamiento de la red sin modificación alguna la mejora es notoria.

— Se incrementa la carga un 50%

Como se proyectó en el caso anterior mientras mayor es la potencia reactiva que se añade en las cargas, menor será los porcentajes de THD, como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Comparación del porcentaje del THD en las 14 barras del sistema, caso C (50%).

Barras	THD (%) (Original)	THD (%) (Mejorado)
BARRA 1	10,60	7,50
BARRA 2	14,10	8,88
BARRA 3	10,58	9,36
BARRA 4	10,69	9,72
BARRA 5	8,13	7,08
BARRA 6	7,98	7,65
BARRA 7	10,52	9,43
BARRA 8	15,21	9,40
BARRA 9	11,22	9,80
BARRA 10	8,07	7,78
BARRA 11	8,03	7,73
BARRA 12	8,02	7,70
BARRA 13	8,14	7,71
BARRA 14	10,00	9,72

En la figura 22, se confirma que al aumentar la potencia reactiva en cada una de las cargas el THD disminuye respecto al caso anterior, se define también que este método es seguro al suscitarse eventos inesperados en la red.

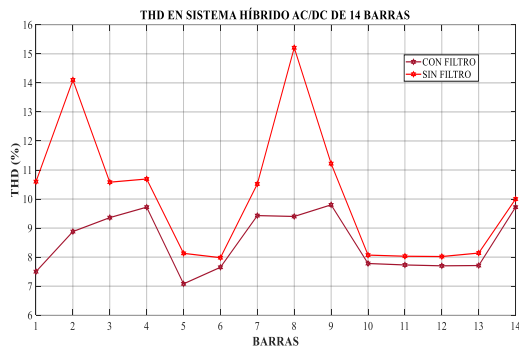


Figura 22. Comparación de armónicos en las 14 barras del sistema para el caso D (50%).

Para finalizar con esta sección se argumenta que al analizar el THD total en cada una de las barras del sistema, disminuye en un cierto porcentaje respecto al escenario sin la implementación del filtro y su comportamiento es notorio respecto a cada uno de los casos de estudio realizados en el documento.

5 Conclusiones

Al finalizar con el análisis de los diferentes casos propuestos para el trabajo realizado se concluye lo siguiente.

- En el trabajo realizado se simula la implementación del control para un filtro de potencia activa con derivación monofásica para la disminución del THD sobre todas las barras que componen el sistema híbrido AC/DC de 14 barras.
- Para evitar que los perfiles de voltaje sobre cada una de las barras disminuyan muy

notablemente debido a la implementación de los SPAFs, se implementó banco de capacitores trifásicos sobre las barras de estudio con la configuración respecto al sector donde fue conectado.

- En la presente investigación se muestra que, al implementar los filtros y el banco de capacitores sobre las barras con mayor problema de armónicos, éstos ayudan de manera global a las demás barras que componen la red, siendo una de las mejores opciones para mantener un control de los armónicos.
- Se observó que la forma de onda del voltaje mejoró notablemente respecto a la inicial sobre las barras de análisis (barra 8 y barra 9), a pesar de la magnitud de la carga que y modelo de generación que se encuentran conectadas en el lugar.
- Se apreció que la forma de onda de voltaje en la barra 9 tiene ciertos intervalos de ruido generado por la carga que no afecta directamente a nuestro análisis.
- Se concluyó que, al conectar los filtros sobre las dos barras de manera simultánea, aparece cierta deformidad respecto a la onda de la barra 8, siendo ésta una de mayor perfección, mientras que en la barra 9 se disminuyó el ruido que aparece en el caso b.
- Para validar los casos de estudio y la eficiencia de este método sobre el sistema, se realizó el análisis del THD sobre todas las barras del sistema y se observa claramente que en todos los

escenarios posibles se cumple con el objetivo que se disminuye los armónicos en las demás barras.

- Finalmente, se argumenta que el método utilizado funciona para cualquier evento que pueda suscitarse sobre la red, para este caso se aumentó la potencia reactiva en un 25% y 50%, sobre las 7 cargas que se encuentran conectadas en el sistema y para ambos casos el THD disminuye aún más.

6 Recomendaciones

- Se recomienda realizar el análisis de los armónicos en diferentes estados del sistema, con la salida y entrada de las diferentes centrales de generación que componen el sistema de 14 barras de la IEEE.
- Se recomienda que los datos obtenidos en las simulaciones se llevan a un apartado en Excel debido al tiempo de simulación del programa.
- Se propone más casos de estudio con el aumento de potencia reactiva de las cargas del sistema para observar la funcionalidad del método.

Referencias

- [1] P. S. Sanjan *et al.*, “Enhancement of power quality in domestic loads using harmonic filters,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197730–197744, 2020.
- [2] A. Talebkhah, M. S. Shadlu, and S. Majid Fatemi, “Control Strategy of a Single Phase Active Power Filter with Adjustable DC Link Capacitor Voltage for THD Reduction in Non-linear Loads,” *2019 10th Int. Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf. PEDSTC 2019*, pp. 606–611, 2019.
- [3] J. Yang, H. Ma, J. Dou, and R. Guo, “Harmonic characteristics data-driven THD prediction method for LEDs using MEA-GRNN and improved-Adaboost algorithm,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31297–31308, 2021.
- [4] E. Skjong, J. A. Suul, A. Rygg, T. A. Johansen, and M. Molinas, “System-Wide Harmonic Mitigation in a Diesel-Electric Ship by Model Predictive Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 7, pp. 4008–4019, 2016.
- [5] A. Bagwari, “Passive-Active Filters for Non-Linear Load,” *Int. Conf. Comun. Syst. Netw. Technol.*, pp. 131–136, 2017.
- [6] J. Fu, L. Chen, H. Zhao, and P. Zhang, “High and Low Frequency Control Strategy for APF DC Side Ripple Voltage under Unbalanced Load,” *2019 IEEE 2nd Int. Conf. Electron. Commun. Eng. ICECE 2019*, no. 1, pp. 326–330, 2019.
- [7] S. Poongothai and S. Srinath, “LS-UPQC for simultaneous voltage and current compensation,” *Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech. ICEEOT 2016*, pp. 220–226, 2016.
- [8] R. Kumar, B. Singh, D. T. Shahani, and C. Jain, “Dual-tree complex wavelet transform-based control algorithm for power quality improvement in a distribution system,” *IEEE Trans.*

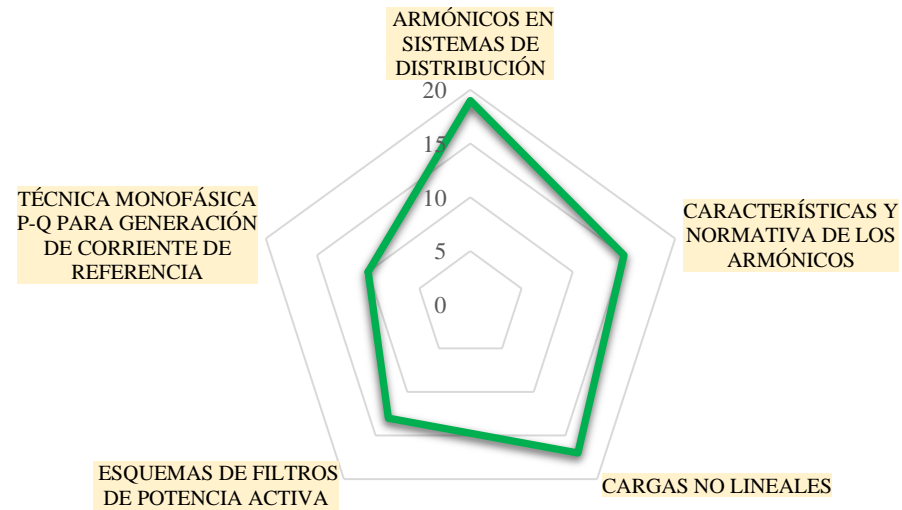
- Ind. Electron.*, vol. 64, no. 1, pp. 764–772, 2017.
- [9] P. Thakur, “Load Distribution and VFD Topology Selection for Harmonic Mitigation in an Optimal Way,” vol. 56, no. 1, pp. 48–56, 2020.
 - [10] R. Setiabudy, G. P. Wibowo, and Herlina, “Selection of Single-tuned Filter and High Pass Damped Filter with Changes of Inverter Type to Reduce Harmonics on Microgrid AC-DC,” *Proc. 2018 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. ICECOS 2018*, vol. 17, pp. 275–280, 2019.
 - [11] S. H. E. A. Aleem, A. M. Ibrahim, and A. F. Zobaa, “Harmonic assessment-based adjusted current total harmonic distortion,” vol. 2016, pp. 64–72, 2016.
 - [12] O. B. Aragonés, “Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas,” *Univ. Politècnica Catalunya*, vol. 2, pp. 0–2, 2003.
 - [13] P. Nayak and B. N. Sahu, “A robust extended Kalman filter for the estimation of time varying power system harmonics in noise,” *2015 IEEE Power, Commun. Inf. Technol. Conf. PCITC 2015 - Proc.*, pp. 635–640, 2016.
 - [14] L. Gumilar, D. E. Cahyani, and M. Sholeh, “Combination Detuned Reactor and C-Type Filter for Electrical Power System under Harmonic Condition,” pp. 219–223, 2020.
 - [15] C. I. Eléctrica, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO,” 2015.
 - [16] M. Elazrag, F. Mnif, A. Bsissa, and L. Sbita, “Analysis and processing of harmonics generated from different charge types installed in a study generic load bench,” *Int. Conf. Green Energy Convers. Syst. GECS 2017*, no. 5, 2017.
 - [17] D. C. Bhonsle and R. B. Kelkar, “Design and simulation of single phase shunt active power filter using MATLAB,” *2011 Int. Conf. Recent Adv. Electr. Electron. Control Eng. IConRAEeCE’11 - Proc.*, pp. 237–241, 2011.
 - [18] G. Son, H. J. Kim, and B. H. Cho, “Improved Modulated Carrier Control with On-Time Doubler for a Single-Phase Shunt Active Power Filter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1715–1723, 2018.
 - [19] H. Singh, M. Kour, D. V. Thanki, and P. Kumar, “A review on Shunt active power filter control strategies,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 121–125, 2018.
 - [20] F. F. Ji, Mansoor, Q. Ai, D. Xie, and C. Chen, “A new type of active power filter with cycle discrete controller on DC bus voltage,” *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 4, no. 10, pp. 1300–1307, 2005.
 - [21] P. S. Magdum and U. T. Patil, “Development of single phase shunt active power filter,” *Proc. Int. Conf. Inven. Commun. Comput. Technol. ICICCT 2017*, no. Icicct, pp. 351–355, 2017.

DISMINUCIÓN DEL THD CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PARA UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVA CON DERIVACIÓN MONOFÁSICA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON ALTA PENETRACIÓN DE CARGAS NO LINEALES.																				
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	CARACTERÍSTICAS Y NORMATIVA DE LOS ARMÓNICOS	CARGAS NO LINEALES	ESQUEMAS DE FILTROS DE POTENCIA ACTIVA	TÉCNICA MONOFÁSICA P.O PARA GENERACIÓN DE CORRIENTE DE REFERENCIA	ARMÓNICOS EN VOLTAJE Y CORRIENTE	EFFECTOS DEL THD SOBRE EL SISTEMA	ANÁLISIS FRECUENCIAL	DEFORMIDAD DE LAS ONDAS A CAUSA DE LOS ARMÓNICOS	VALORES DE LAS IMPEDANCIAS Y RESISTENCIAS EN LAS LINEAS DE DISTRIBUCIÓN	VALORES DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS EN CENTRALES DE GENERACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRAS DEL SISTEMA	FILTROS PASIVOS COMO LAS IMPEDANCIAS ANTIARMÓNICAS O LLAMADOS SHUNT RESONANTES	FILTRO HÍBRIDO (FILTRO ACTIVO Y PASIVO)	IMPEDANCIAS DE AISLADO, CONECTADAS A LAS CARGAS NO LINEALES, FILTROS EN CARGADORES Y ALIEMTADORES	FILTRO DE POTENCIA ACTIVA CON DERIVACIÓN MONOFÁSICA	BANCO DE CAPACITORES TRIFÁSICO	ARMÓNICOS BAJO NORMATIVA
1	2020	Enhancement of power quality in domestic loads using harmonic filters.	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒
2	2019	Control Strategy of a Single Phase Active Power Filter with Adjustable DC Link Capacitor Voltage for THD Reduction in Non-linear Loads.	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒
3	2021	Harmonic characteristics data-driven THD prediction method for LEDs using MEA-GRNN and improved-Adaboost algorithm.	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒

4	2016	System-Wide Harmonic Mitigation in a Diesel-Electric Ship by Model Predictive Control.	✖	☐	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	☐	☐	☐	✖	✖	☐	✖	☐	✖
5	2017	Passive-Active Filters for Non-Linear Load.	☐	✖	✖	✖	✖	✖	☐	☐	✖	☐	✖	✖	✖	☐	✖	✖	☐	✖
6	2019	High and Low Frequency Control Strategy for APF DC Side Ripple Voltage under Unbalanced Load.	✖	☐	✖	☐	☐	✖	✖	✖	✖	☐	☐	☐	☐	✖	☐	✖	☐	✖
7	2016	LS-UPQC for simultaneous voltage and current compensation.	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	☐	☐	✖	☐	✖	☐	✖	✖	✖	✖
8	2017	Dual-tree complex wavelet transform-based control algorithm for power quality improvement in a distribution system.	✖	✖	☐	✖	☐	✖	✖	☐	✖	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐
9	2020	Load Distribution and VFD Topology Selection for Harmonic Mitigation in an Optimal Way.	✖	☐	☐	✖	☐	☐	✖	☐	✖	☐	✖	✖	☐	✖	✖	☐	☐	✖
10	2019	Selection of Single-tuned Filter and High Pass Damped Filter with Changes of Inverter Type to Reduce Harmonics on Microgrid AC-DC.	✖	☐	✖	☐	☐	✖	✖	✖	✖	☐	☐	☐	✖	✖	✖	☐	✖	☐
11	2016	Harmonic assessment-based adjusted current total harmonic distortion.	☐	✖	☐	✖	✖	✖	☐	✖	✖	☐	☐	☐	☐	✖	☐	✖	☐	✖
12	2003	Estudio y modelizacion en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas	✖	✖	✖	✖	☐	✖	✖	✖	☐	☐	✖	☐	✖	☐	☐	☐	☐	✖

13	2020	Combination Detuned Reactor and C-Type Filter for Electrical Power System under Harmonic Condition.	✖	✖	□	□	□	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	□	✖	□	✖	✖	□
14	2015	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	✖	□	✖
15	2017	Analysis and processing of harmonics generated from different charge types installed in a study generic load bench.	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	✖
16	2011	Design and simulation of single phase shunt active power filter using MATLAB.	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	✖	□	✖
17	2018	Improved Modulated Carrier Control with On-Time Doubler for a Single-Phase Shunt Active Power Filter.	✖	✖	✖	□	□	✖	□	✖	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	✖	✖
18	2018	A review on Shunt active power filter control strategies.	✖	□	□	✖	□	□	✖	✖	✖	□	✖	□	✖	✖		✖	✖	✖
19	2015	A new type of active power filter with cycle discrete controller on DC bus voltage.	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	□	□	✖	□	✖	✖	✖	✖	□
20	2017	Development of single phase shunt active power filter.	□	□	✖	□	✖	✖	✖	□	✖	□	□	✖	□	✖	□	✖	✖	✖
21	2020	Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement	✖	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	□	✖	✖	✖
			19	15	17	13	10	17	16	14	16	2	12	8	10	14	5	16	10	17

TEMÁTICA



FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

